

LADRILLO REFRACTARIO AISLANTE - EFECTO DEL MÉTODO DE FABRICACIÓN SOBRE EL RENDIMIENTO DEL PRODUCTO

RESUMEN

Los productos aislantes para altas temperaturas siguen siendo un componente vital en muchas instalaciones industriales. El ladrillo refractario aislante (IFB) mantiene una posición única dentro de la cartera disponible de productos aislantes para altas temperaturas, ya que ofrece una combinación única de propiedades aislantes con capacidad de soporte de cargas. Los IFB están particularmente indicados para aplicaciones por encima de los 1000°C, donde la conductividad térmica es tan baja como los productos de fibra cerámica (en algunos casos incluso menor), pero con una integridad estructural capaz de tratar con entornos erosivos y abrasivos.

A fin de que las empresas se aseguren de conseguir el consumo energético más eficiente posible, es importante que los diseñadores de instalaciones industriales entiendan que no todos los IFB son lo mismo. Es importante al seleccionar los IFB para una aplicación específica saber cómo las diferentes combinaciones de parámetros de rendimiento son las más adecuadas para las condiciones de trabajo existentes. También es importante comprender que la instalación térmicamente más eficaz sólo se consigue con la combinación correcta de los productos.

Este artículo se centra en cómo los tres principales procesos de fabricación de IFB (moldeo, extrusión y "slinger") influyen sobre la naturaleza del producto obtenido. Describe cómo la combinación de proceso de producción y materias primas usadas controla la naturaleza de la microestructura, la distribución de los tamaños de poro y las fases mineralógicas presentes lo que, a su vez, controla el rendimiento. Las combinaciones de los parámetros de rendimientos de los IFB se correlacionan frente a varias aplicaciones industriales para demostrar cómo puede conseguirse una selección óptima del producto.

INTRODUCCIÓN

Los ladrillos refractarios aislantes desempeñan un papel importante en el paquete de soluciones de aislamiento a altas temperaturas que necesitan globalmente las industrias. Las tres soluciones clave (FCR (fibras cerámicas refractarias), IFB y monolíticos proporcionan una serie exclusiva de ventajas que hacen de ellas el producto de elección para diversas condiciones.

La Tabla 1 muestra los atributos de rendimiento clave que distinguen cada clase de tecnología aislante. Para el diseño de instalaciones, los IFB se especificarían por lo general regiones donde la temperatura es superior a 1000°C, donde la temperatura es generalmente constante durante el uso y donde puede haber gases corrosivos. Además de estas especificaciones, en algunos países la preocupación creciente sobre la

clasificación carcinogénica de FCR ha hecho que los usuarios hayan evaluado de nuevo los IFB en aplicaciones donde podría haberse usado antes FCR, aunque a temperaturas bajas la FCR puede sustituirse ahora con productos de fibra biosoluble. Para un diseñador que haya seguido esta lógica y haya tomado la decisión de que el IFB es la elección más apropiada, debe seleccionar entonces el IFB correcto pues hay muchos donde elegir.

Tab. 1. Atributos de rendimiento clave de las tecnologías de aislamiento a alta temperatura.

FIBRA	Mejor aislamiento <1000°C Mayor eficiencia energética (lote) Mejor resistencia al choque térmico
IFB	Mejor aislamiento >1000°C Mayor eficiencia energética (continua) Mejor resistencia a gases corrosivos
MONOLITICOS	Mejor resistencia a ambientes abrasivos Mejor resistencia al contacto con metal fundido Más fácil instalación (inyección, bombeo)

La principal nomenclatura estándar internacional usada para los IFB es ASTM C-155-97, que se basa en la clasificación de temperatura en °F, aunque en la práctica la temperatura de servicio máxima está generalmente 100°F por debajo de esta clasificación. Así, un LAR del grupo 23 tiene una clasificación de 2300°F, aunque la temperatura de uso práctico es de 2200°F. Los grados de IFB más comunes son 23, 26, 28, 30 y 32, aunque hay otros disponibles. La Figura 1 ilustra cómo la composición de los principales grados de IFB cambia conforme a la temperatura de clasificación.

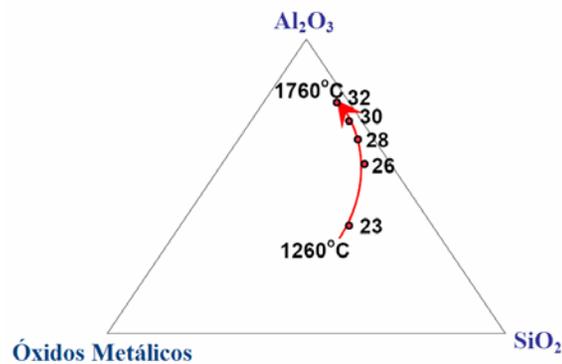


Fig. 1. Diagrama de fase ternaria de los grados de IFB frente a la clasificación de temperatura.

COMPARACIÓN DE PROPIEDADES

La Tabla 2 indica las principales propiedades físicas de tres IFB disponibles en el mercado, seleccionados como representantes de los tres métodos de fabricación. Representan el grupo 23 del producto, con una clasificación de temperatura de 2300°F/1260°C.

El proceso de “moldeo” utiliza mortero de yeso como medio de secado rápido para una mezcla de arcilla de alto contenido en agua, con algunos aditivos quemados adicionales. El proceso “slinger” es una forma de extrusión a baja presión de una mezcla húmeda de arcilla, con el paso adicional de que el material semi-extruido se “lanza” a una cinta continua para generar una porosidad adicional antes del secado y cochura. El proceso de

“extrusión” fuerza una mezcla húmeda de arcilla que contiene aditivos quemados a través de una boquilla de extrusión, donde el extrusionado se corta en ladrillos, se seca y se cuece. Más detalles sobre estos procedimientos de fabricación se encontrarán en la bibliografía [1]. Es importante indicar que hay otras tecnologías de formación usadas por los fabricantes, entre ellas el prensado y el espumado, aunque los IFB hechos con estos procesos son mucho menos comunes en el mercado y no se tratan en este artículo.

Proceso de fabricación	Moldeo	Slinger	Extrusion
Densidad (kg/m ³)	483	611	520
MOR (MPa)	1	0.7	1.2
CCS (MPa)	1.2	0.9	2
PLC(%) tras 24h y 1230°C	-0.2	0	0
Expansión lineal reversible (%)	0.5	0.6	0.6
Deformación con carga térmica %, tras 90 min; 1100°C y 0,034 MPa	0.1	0	0.1

Los datos de densidad indicados en la Tabla 2 son la media de las medidas registradas en 6 ladrillos seleccionados aleatoriamente en un lote más grande del producto. El resto de los datos de las propiedades físicas son por lo general medias de tres mediciones, mientras que los datos químicos y mineralógicos de la Tabla 3 se miden en una muestra tomada de modo aleatorio del lote.

Los datos de propiedades de la Tabla 2 ilustran la variedad de densidades disponibles para los IFB del grupo 23 a través de las diferentes técnicas de fabricación. El proceso de moldeo da el producto de menor densidad, mientras que los IFB extrusionados ofrecen el producto más fuerte de los tres en términos de propiedades medidas a temperatura ambiente, lo cual hace que sean el producto más resistente a un manejo brusco. Suele utilizarse la densidad como una guía aproximada en términos de propiedades aislantes de un IFB, indicando que la menor densidad ofrece el mayor aislamiento, aunque más adelante veremos que para productos de similar composición la microestructura del producto es el principal factor controlador a la hora de determinar la conductividad térmica.

Tabla 3. Composición química de IFB del grupo 23

Proceso de fabricación	Moldeo	Slinger	Extrusion
% Al ₂ O ₃	37	38.8	42.7
% SiO ₂	44.4	47.8	52
% Fe ₂ O ₃	0.7	0.4	1.2
% TiO ₂	1.2	1.6	1.4
% CaO	15.2	10.9	0.7
% MgO	0.4	0.2	0.6
% Na ₂ O + K ₂ O	1.1	0.3	1.4
Fase cristalina principal	anortita	anortita	mulita
Fase cristalina menor		mulita	silice

Los datos químicos de la Tabla 3 ilustran algunas diferencias de composición clave en los IFB cuando cambian de moldeo a slinger y a extrusión. El proceso de moldeo produce un IFB que por lo general es anortita (CaO·Al₂O₃·2SiO₂), mientras que la extrusión produce un IFB que contiene en su mayoría mulita (3Al₂O₃·2SiO₂). El ladrillo slinger tiene una mezcla de ambas fases. Esto es consecuencia de las diferencias entre las técnicas de fabricación. El proceso de moldeo se basa en un mortero de yeso como fase ligante, lo

que proporciona la fuente de Ca que reacciona con la arcilla en la mezcla para formar anortita después de una sinterización a alta temperatura.

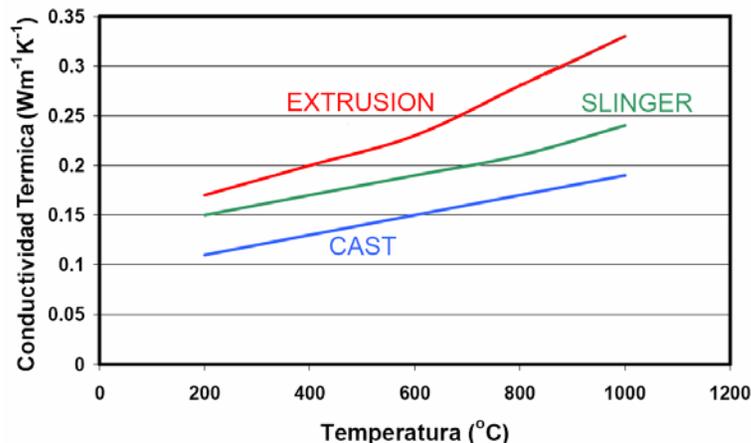
Los procesos slinger y de extrusión no están tan limitados en su elección de materias primas, ofreciendo a los fabricantes la capacidad de alterar la composición para adaptarse a una variedad más amplia de aplicaciones. Ya que la anortita proporciona una mejor resistencia a los álcalis en comparación a la mulita, los fabricantes que usan el proceso slinger suelen intentar favorecer la formación de anortita añadiendo CaCO_3 a la mezcla. Un efecto secundario de la adición de carbonato es un aumento del encogimiento durante la cocción y por consiguiente hay un límite al nivel de CaCO_3 que puede añadirse. Por lo tanto este tipo de slinger producía un ladrillo que no conseguía la conversión completa a anortita, con presencia de alguna formación de mulita. En el ladrillo estudiado en este artículo, el IFB extrusionado no tenía adiciones de Ca y forma entonces mulita como fase principal.

Los procesos slinger y de extrusión son mucho menos sensibles a las variaciones de las materias primas que el proceso de moldeo. Mientras que este último normalmente sólo usa yeso como medio de solidificación, los procesos slinger y de extrusión pueden usar cualquier mezcla de arcillas plásticas y aditivos. Como consecuencia de esta capacidad de variar la mezcla en el proceso slinger, los fabricantes ofrecen normalmente una versión de IFB del grupo 3 con baja cantidad de Ca, que ofrece propiedades similares a las del product extrusionado.

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

El parámetro de rendimiento más importante para un IFB es la conductividad térmica, y esta es la propiedad que determina la eficiencia aislante del producto. La Figura 2 muestra cómo la conductividad térmica, medida por el método ASTM C-201, cambia con la temperatura para los tres tipos de IFB de este estudio.

Fig. 2 Conductividad termica frente a temperatura para IFB del grupo 23



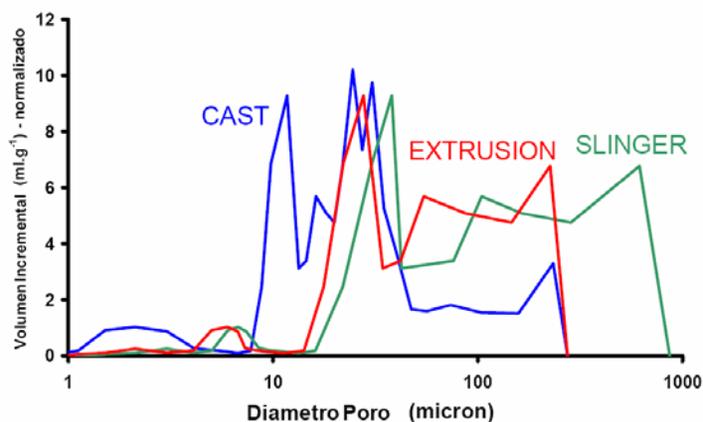
El IFB moldeado ofrece la menor conductividad térmica a lo largo del intervalo de temperaturas. Tiene también la menor densidad de los productos, acorde a la regla de que la menor densidad ofrece el mejor aislamiento. Sin embargo, el siguiente producto de menor densidad, el IFB extrusionado, muestra realmente la mayor conductividad térmica de los tres, es decir, la peor capacidad aislante. Esto va en contra de esa regla general. De hecho, la densidad no es aquí el factor controlador. Los diferentes métodos de fabricación generan productos de microestructuras muy diversas. El tamaño, la forma y la distribución de la porosidad en estos IFB

influyen poderosamente sobre la capacidad de cada tipo de product para controlar los mecanismos de conducción, convección y radiación de la transferencia de calor.

DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DE PORO

Los tres procesos de fabricación afectan a la estructura del poro del IFB, tanto a escala macroscópica como microscópica. La Figura 3 muestra la distribución del tamaño de poro de los tres tipos de IFB medido mediante porosimetría de mercurio.

Fig. 3. Distribución del tamaño de poro de los IFB del grupo 23



Los tres tipos de IFB comparten un agrupamiento común de los tamaños de poro alrededor de 40-60 Rm. Fuera de este rango, el ladrillo moldeado presenta las mayores cantidades de poros más finos ≤ 10 Rm. El IFB extrusionado tiene más porosidad en el intervalo 50-300 Rm. El IFB slinger contiene poca porosidad fina pero muestra los tamaños de poro más grandes de los tres, con cantidades significativas en el rango de 100-800 Rm. Sin embargo, para 600-800 Rm la porosimetría de mercurio alcanza su límite de precisión en la medida del tamaño de los poros. Comparando los datos de la Fig. 3 con los de conductividad térmica de la Fig. 2 se ve que los rangos de tamaño de poro para los tres IFB no siguen el mismo orden que la tendencia de la conductividad térmica. Mientras que el ladrillo moldeado, con su estructura de poro más fino muestra la menor conductividad térmica, el IFB slinger con los tamaños de poro aparente más grandes no tiene la mayor conductividad térmica de los tres. Esto sugiere que los datos de porosimetría de mercurio solos no nos muestran toda la historia acerca de la estructura del IFB. Para entender de manera más completa esta estructura, tenemos que considerar también la macroestructura, los tamaños de poro superiores a 600-800 Rm.

La Fig. 4 muestra fotografías ópticas de la macroestructura de los tres IFB. La textura de los tres tipos de IFB se presenta muy diferente. El ladrillo moldeado tiene una estructura mucho más fina, con algunos poros grandes. El ladrillo slinger tiene una textura más granular, con una gran cantidad de poros de gran tamaño. El IFB extrusionado tiene una estructura fina en la matriz, pero los mayores tamaños de poro a escala macro. Los mayores tamaños de poro en los IFB se forman cuando los aditivos quemados se queman durante el proceso de cochura. El tipo y el tamaño del aditivo quemado usado en la mezcla determinan el tamaño de la mayor porosidad que queda en la estructura.

Combinando los datos del tamaño de poro procedentes de la porosimetría de mercurio con un análisis de la macrotextura, se puede entender mejor la tendencia de la conductividad térmica de la Fig. 3. El IFB

extrusionado tiene la mayor conductividad térmica porque tiene los mayores tamaños de poro, lo que contribuye poco a retardar el flujo de calor pero contribuye de manera significativa a conseguir una baja densidad. El IFB moldeado tiene la conductividad térmica más baja porque tiene la estructura de poro más fina, lo cual interfiere de manera efectiva con los mecanismos de transferencia de calor.

SELECCIÓN DEL PRODUCTO

Con esta comprensión más profunda de la composición y la estructura de los diferentes tipos de IFB disponibles es ahora posible comparar y contrastar las propiedades de los 3 tipos principales y, por consiguiente, seleccionar el IFB más adecuado para los distintos ambientes de uso.

IFB Moldeado

- *Ventajas –*

1. Mejor aislamiento debido a la conductividad térmica más baja, para conseguir los máximos ahorros energéticos y los revestimientos más delgados.
2. Ladrillo de peso más ligero debido a la menor densidad, para facilidad de transporte.
3. Mejor resistencia a atmósferas de hidrógeno debido a la falta de sílice libre en la estructura.
4. Mejor resistencia a álcalis ya que la estructura de anortita puede absorber los álcalis en una solución sólida.
5. Mejor capacidad de mecanizado, por ej. para fijar elementos en hornos.

- *Desventajas –*

1. Mayor fragilidad, requiere el manejo más cuidadoso
2. Menor resistencia debido a la baja densidad y el contenido de cristal.
3. Menor resistencia al choque térmico debido a la menor resistencia y la baja conductividad térmica.
4. El Ca limita la capacidad de temperatura.
5. Máximo coste de fabricación.

- *Mejores aplicaciones*

1. Hornos de funcionamiento continuo, por ej. hornos de túnel y calentadores petroquímicos, ya que la eficiencia aislante minimiza los costes energéticos.
2. Hornos de aficionados, que pueden mecanizarse y son resistentes al esmalte.

3. Hornos anódicos de carbono para la industria del aluminio, debido a la máxima capacidad aislante.

LRS Slinger

- *Ventajas –*

1. Mayor densidad, por tanto más robusto para manejar
2. Capacidad de alta temperatura debido a que son posibles con facilidad los cambios de composición.
3. Buena resistencia al azufre.

- *Desventajas –*

1. Menor resistencia que el extrusionado.
2. Generalmente poca resistencia a álcalis, que forman eutécticos con mulita (aunque hay disponibles formulaciones especiales con un mayor resistencia a los álcalis).
3. Poca resistencia a atmósferas de hidrógeno.

- *Mejores aplicaciones -*

1. Unidades de recuperación de azufre y otras unidades petroquímicas donde se requiere resistencia al azufre.
2. Hornos de funcionamiento continuo a temperaturas más altas, por ej. hornos de túnel para la industria cerámica, donde la temperatura de servicio es superior a la capacidad del IFB moldeado.

IFS Extrusionado

- *Ventajas –*

1. Máximas resistencias, para robustez durante el manejo y mayor capacidad de carga durante el uso.
2. Ladrillo ligero, para facilidad de transporte.
3. Capacidad de alta temperatura por ser posibles con facilidad los cambios de composición.
4. Mejor resistencia al choque térmico debido a una mayor resistencia y mayor conductividad térmica.
5. El menor coste de fabricación.

- *Desventajas –*

1. Menor capacidad de aislamiento debido a la elevada conductividad térmica.
 2. Poca resistencia a los álcalis (aunque hay disponibles formulaciones especiales con un mayor resistencia a los álcalis).
 3. Poca resistencia a atmósferas de hidrógeno.
- *Mejores aplicaciones -*
 1. Aplicaciones de baja carga - base de muros donde el ahorro energético no es tan esencial.
 2. Proyecto donde el precio es esencial - ya que el IFB extrusionado ofrece la opción de menor coste.

CONCLUSIONES

Los diferentes procesos de formación usados rutinariamente para la fabricación de IFB han demostrado producir ladrillos de composición y estructura muy diferentes. La composición mineralógica controla la resistencia de los IFB a diferentes atmósferas de uso final. Las propiedades aislantes de los IFB están controladas por la influencia combinada de la microporosidad y la macroporosidad.